

## Views &amp; Comments

## 封装天线技术

张跃平

*School of Electrical and Electronic Engineering, Nanyang Technological University, Singapore 639798, Singapore*

## 1. 引言

自20世纪90年代中期以来,互补金属氧化物半导体(CMOS)已经成为无线革命的技术驱动力[1],实现了蓝牙无线电、60 GHz无线电和79 GHz雷达的系统级芯片(SoC)集成。事实上,CMOS目前在第五代(5G)新无线电(NR)半导体技术中占据主导地位[2]。

封装天线(AiP)概念旨在为新兴的无线SoC或单芯片无线电提供很好的天线解决方案[3]。它探索了基于封装材料和工艺将天线或阵列(或多个天线或阵列)与无线芯片(或多个芯片)集成在封装内实现系统级无线功能。在AiP概念中,研究人员首次将辐射功能引入到芯片封装中。因此,它丰富和提升了系统级封装(SiP)概念的完整性[4–5]。如今,AiP是毫米波(mmWave)5G NR的首选天线和封装技术[6]。

天线具有独特的辐射特性,使得无线通信和检测的实现成为可能。在射频(RF)频段,如何在保持辐射效率的同时缩小天线尺寸成为一项具有挑战性的任务;相比之下,在毫米波频段,难点在于如何将芯片与阵列元件之间互连的插入损耗降到最低。AiP技术为这些挑战提供了一个简明的解决方案。因此,它从本质上改变了用于无线应用的无线电和雷达的设计和实现[7]。

## 2. 设计考虑

无线电和雷达设计的第一个改变是激励电子设计自动化公司开发协同设计平台,使设计人员能够在设计和实现期间考虑对天线和芯片在封装中进行无缝集成[8]。AiP技术为天线和电路的设计创造了更大的自由空间:①可以消除天线与电路之间50 Ω接口的约束。50 Ω的标准是针对使用同轴电缆连接或测量的分离天线和电路定下来的。AiP是一种集成结构,其中利用传输线、通孔和凸点进行互连。②金属氧化物半导体(MOS)晶体管是AiP中最重要的有源器件。它在电路中充当开关或电流源。发射/接收开关是连接到天线的电路。研究人员已经开发了一种新的带有全波电磁求解器[如高频电磁结构仿真软件(HFSS)]的天线和开关协同设计方法,该方法将MOS晶体管视为一个导通电阻或开路电容的无源结构。此外,该方法正被推广到天线和基于开关功率放大器的协同设计中。③如果需要将MOS晶体管建模为电流源,则必须使用电路仿真器进行协同设计,如Cadence AWR Microwave Office。电路仿真器依靠的是紧凑的电路模型。因此,构建一个AiP的电路模型是至关重要的[9]。事实证明,该电路模型可以通过物理方法推导,也可以用数值方法提取。④电感器通常用于与MOS晶体管的寄生电容谐振。然而,由于电感体积大且有损耗,因此最好避免使用它们。以一个典型的低噪声放大器为例,传统的设计使用两个片上电

感，而协同设计能够取代电感的方式包括通过探索键合线电感或使天线具有电感特性（而不是  $50\ \Omega$ ），以抵消低噪声放大器中 MOS 晶体管的电容效应。

### 3. 大批量生产和测试

AiP 技术促进了新材料和新工艺的发展[10]。笔者所说的新材料是指天然材料，而不是超材料。尽管如此，在过去的 20 年里，超材料也引起了研究人员极大的研究兴趣。一些使用超材料的 AiP 设计也得到了尝试。据研究人员观察发现，使用高阻抗表面作为人工磁导体，可以获得薄剖面和低背向辐射[11]。然而，基于超材料的 AiP 由于成本高的原因而很少被工业界采用。为了减少表面波和提高天线辐射效率，开发了在低温共烧陶瓷（LTCC）材料中嵌入空气腔或穿透空气孔的非标准工艺，对 AiP 进行大批量生产（HVM）。三星和英特尔分别探索了高密度互连（HDI）材料和工艺，用于 60 GHz 无线电 AiP 的大规模生产。国际商用机器公司（IBM）使用有机材料开发了表面层合电路板（SLC）工艺，用于毫米波 5G NR 基站大型 AiP 的 HVM [12]。上述 HDI 和 SLC 都采用了平衡式基片。专门为低成本生产 AiP 开发了一种新型 HDI 工艺，实现了非平衡式基片。英飞凌公司获得的专利是关于嵌入式晶圆级封装工艺（eWLB）技术，与 LTCC、HDI 和 SLC 存在本质的区别；eWLB 的特点是无层压基片，但是有一个铜再分布层[13]。它已被证明是一种大批量生产小型 AiP 的替代方法[14]。然而，单一的再分布层限制了通过 eWLB 实现复杂的 AiP。为了获得更多的再分布层，台湾积体电路制造股份有限公司（TSMC）开发了 InFO，它将馈电网络布置在封装底部的再分布层，将天线元件布置在封装顶部的再分布层。因此，InFO-AiP 可以为 5G NR 终端生产外形尺寸更小、增益更高的 AiP [15]。SJ 半导体公司（SJSemi）开发了 SmartAiP 技术，该技术提供了超高铜垂直互连、多层双面细节距再分布层、晶圆级多层精密对准天线等。SmartAiP 通过提供 24~43 GHz 的超宽带解决方案，以适应全球不同国家分配的各种频谱，从而展现了其低插入损耗的优势[16]。此外，AiP 面临的一个严重问题是电磁干扰（EMI）。使用激光开槽、浆料填充和金属涂层的共形屏蔽和隔层屏蔽可以有效抑制 AiP 中 EMI 的产生。

AiP 技术将天线和封装的测量提升到一个前所未有的水平。研究人员正在为 AiP 开发和改进新的测试方法和设备。基于探针的天线测量设备已成为在实验室中准确表征 AiP 的必要装置[17]。这种装置使用地-信号-地（GSG）探针为 AiP 馈电，并使用标准增益天线在远场距离围绕 AiP

旋转以测量辐射方向图。目前，研究人员已经设计背向和弯曲探针技术，以最大限度地减少探针辐射的影响及传统探针反射造成的阻挡和扰动，从而扩大了动态范围。在生产线上对 AiP 进行快速测试需要使用带有 OTA 系统的自动化测试设备（ATE）[18]。OTA 系统可以配置在远场、辐射近场和感应近场。研究发现，辐射近场在复杂性和成本方面对大批量 AiP 测试具有显著优势。

### 4. 应用

AiP 技术具有广泛的应用，如 2.4 GHz 的物联网，60 GHz 的虚拟现实、增强现实和手势识别，以及 79 GHz 的汽车雷达。然而，AiP 技术真正具有突破性的应用是在 28 GHz 和 39 GHz 的 5G NR 智能手机方面。图 1 展示了手机天线的演变和可能的发展趋势。关于该图，笔者特别强调，无论是现在还是将来，整体天线和集成天线都会在智能手机中共存。

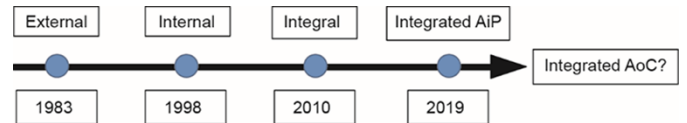


图 1. 手机天线设置的演变。AoC：片上天线。

研究人员将继续探索 AiP 技术在新领域的应用；例如，AiP 技术已经开始渗透到无创健康监测的医疗领域中。然而，由于在医疗领域的应用中产品的认证周期比较长，因此该领域的进入门槛很高。除此之外，AiP 技术在基于毫米波 5G 的工业互联网中的应用具有巨大的潜力。

### 5. 结论

综上所述，AiP 技术不再是一种选择性技术；它目前是无无线 SoC 的必选技术。该技术将对天线和封装行业产生巨大的影响。传统的天线行业必将会失去一些业务，而外包半导体组装和测试（OSAT）公司将首次把相关业务扩展到天线领域。未来，AiP 技术将在实现非常大规模的天线集成方面发挥重要作用。该技术还将被用来提高片上天线技术的太赫兹天线性能[19]。

### References

- [1] Abidi AA. RF CMOS come of age. IEEE Microw Mag 2003;4(4):47–60.
- [2] Dunworth JD, Homayoun A, Ku BH, Ou YC, Chakraborty K, Liu G, et al. A 28 GHz BULK-CMOS dual-polarization phased-array transceiver with 24

- channels for 5G user and basestation equipment. In: Proceedings of 2018 IEEE International Solid-State Circuits Conference; 2018 Feb 11–15; San Francisco, CA, USA; 2018. p. 70–2.
- [3] Zhang YP. Antenna-in-package technology: its early development. *IEEE Antennas Propag Mag* 2019;61(3):111–8.
- [4] Liu D, Zhang YP. Integration of array antennas in chip package for 60-GHz radios. *Proc IEEE* 2012;100(7):2364–71.
- [5] Zhang YP, Sun M, Liu D, Lu Y. Dual grid array antennas in a thin-profile package for flip-chip interconnection to highly integrated 60-GHz radios. *IEEE T Antenna Propag* 2011;59(4):1191–9.
- [6] Elisabeth S, Malaquin C. Antenna in Package (AiP): disrupting wireless communication and HMI. *Chip Scale Rev* 2020;24(1):4–7.
- [7] Rappaport TS, Heath Jr RW, Daniels RC, Murdock JN. *Millimeter wave wireless communication*. New York: Pentice-Hall; 2015.
- [8] Issakov V, Wojnowski M, Knapp H, Trotta S, Forstner HP, Pressel K, et al. Cosimulation and co-design of chip-package-board interfaces in highlyintegrated RF systems. In: Proceedings of 2016 IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting (BCTM); 2016 Sep 25–27; New Brunswick, NJ, USA; 2016. p. 94–101.
- [9] Wang JJ, Zhang YP, Chua KM, Lu ACW. Circuit model of microstrip patch antenna on ceramic land grid array package for antenna-chip codesign of highly integrated RF transceivers. *IEEE T Antenna Propag* 2005;53(12):3877–83.
- [10] Zhang YP, Mao JF. An overview of the development of antenna-in-package technology for highly integrated wireless devices. *Proc IEEE* 2019; 107(11): 2265–80.
- [11] Kyriazidou CA, Contopanagos HF, Alexopoulos NG. Space-frequency projection of planar AMC on integrated antennas for 60 GHz radios. *IEEE T Antenna Propag* 2012;60(4):1899–909.
- [12] Liu D, Gu X, Baks CW, Valdes-Garcia A. Antenna-in-package design considerations for Ka-band 5G communication applications. *IEEE T Antenna Propag* 2017;65(12):6372–9.
- [13] Brunnbauer M, Fürtig E, Beer G, Meyer T. Embedded wafer level ball grid array(eWLB). In: Proceedings of 2006 8th Electronics Packaging Technology Conference; 2006 Dec 6–8; Singapore; 2006.
- [14] Nasr I, Jungmaier R, Baheti A, Noppeney D, Bal JS, Wojnowski M, et al. A highly integrated 60 GHz 6-channel transceiver with antenna in package for smart sensing and short-range communications. *IEEE J Solid-St Circ* 2016;51(9):2066–76.
- [15] Tsai CH, Hsu CW, Kao KY, Tang TC, Lu CL, Wu KC, et al. Fabrication and characterization of millimeter wave 3D InFO dipole antenna array integrated with CMOS front-end circuits. In: Proceedings of 2019 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM); 2019 Dec 7–11; San Francisco, CA, USA; 2019.
- [16] Yu B, Qian Z, Lin C, Lin J, Zhang YP, Yang G, et al. A wideband mmWave antenna in fan-out wafer level packaging with tall vertical interconnects for 5G wireless communication. *IEEE T Antenna Propag* 2021;69(10):6906–11.
- [17] Zheng Z, Zhang YP, Shi L, Wu L, Mao JF. An overview of probe-based millimetre-wave/terahertz far-field antenna measurement setups. *IEEE Antennas Propag Mag* 2021;63(2):63–118.
- [18] Moreira J. Testing AiP modules in high-volume production for 5G applications. *Chip Scale Rev* 2020;24(6):31–6.
- [19] Zhang YP, Liu D. Antenna-on-chip and antenna-in-package solutions to highly integrated millimeter-wave devices for wireless communications. *IEEE T Antenna Propag* 2009;57(10):2830–41.